DOI: 10.22067/jacsm.2022.74655.1090 *https://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir/?lang=en*

The Effects of Flower Pattern on Uniform Distribution of Force on Rollers in Cold Roll Reshaping*

Hosain Arzandeh[1], Hasan Moslemi Naeini[2]

Mahdi Tajdari[3], Siamak Mazdak[4], Manabo Kiuchi[5]

1. Introduction

Flower pattern is the most important factor for analyzing the reshaping of cold roll forming process. In this process, the mechanical properties of the final product depend on the flower pattern. Moreover, improper flower pattern and non-uniform hardening of the tube cause collapse defect.

In previous studies, the effect of flower pattern design on the applied force on rollers has not been reported. On the other hand, craftsmen need that the wear conditions of the rollers be uniform; therefore, it is necessary that the vertical force distribution on the rollers be uniform. In this study, the amount of height reduction for three different flower patterns, according to the experimental sample, uniform distribution method, and proportional distribution method, were investigated by finite element simulation. Moreover, to validate the simulation results, the power consumption and geometrical shape of the product obtained from the simulation with its experimental sample were compared and there is good agreement has been observed. Finally, for the three flower patterns, power consumption, geometric shape of the product, and the force on the rollers were compared with each other and based on the results, the appropriate flower pattern was selected.

2. Numerical simulation

Numerical simulation was performed on a 40 x 60 mm rectangular cross section with a thickness of 3 mm. The pipe is made of ST37 steel sheet. To determine the properties of the sheet, samples were prepared from the production line. The tube was modeled by solid element, and the whole simulation was carried out at one step with dynamic explicit properties.

3. Experimental test

To confirm the simulation results, an experimental test was performed and the results of the simulations were compared with experiments.

4. Results and discussion

Table 1 shows the amount of force applied to the rollers according to the simulation results of different flower patterns. It is observed that the values of the applied forces are highly dependent on the flower patterns. Moreover, the distribution of these forces in the experimental model is more uniform than other models.

Figure 1 shows the distribution of power consumption in stations according to different flower patterns. It is observed that the power consumption of the experimental method in the last stations is less than other methods, so the residual stress in the product in this method will be less than others. According to Figure 2, the experimental method was 17% and 31% more successful in forming the corners than the proportional and uniform distribution patterns, respectively.

Table 1. The comparison of forces on rollers in proportional distribution, uniform, and experimental distribution

Amount of force in simulating various types of flower patterns (kN)			Stand No.
experimental	uniform distribution	proportional distribution	
51	35	42	1
43.5	40	50	2
50	44	50	3
50	48	56	4
56.5	53.5	59.5	5
50.2	44.1	51.5	Avg.
-6.7 +6.3	-9.1 +9.4	-9.5 +8	min and max difference of Avg.
13%	21%	17%	Percentage Deviation from uniformity over Avg.

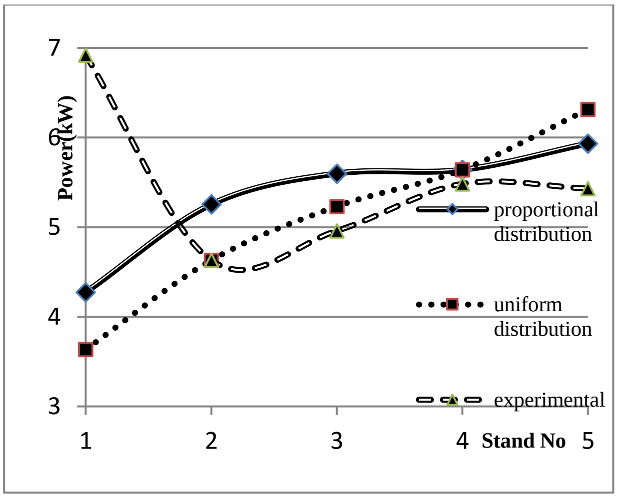


Figure 1. The distribution of power consumption in stations according to different flower patterns

*Manuscript received, January. 10, 2020; Revised. April, 10, 2022, Accepted. May, 10, 2020.

۱. PhD Candidate in Manufacturing Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

۲. Corresponding Author: Professor of the Faculty of Mechanics Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Email: moslemi@modares.ac.ir

۳. Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Electronic, Mechanics and Computer Engineering, Ivanki University, Ivanki, Iran.

۴. Assistant Professor, Faculty of Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.

۵. Manabo Kiuchi, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Bunkyo, Japan

Figure 2 shows also that increasing the non-uniformity of the force distribution increases the corner radius error.

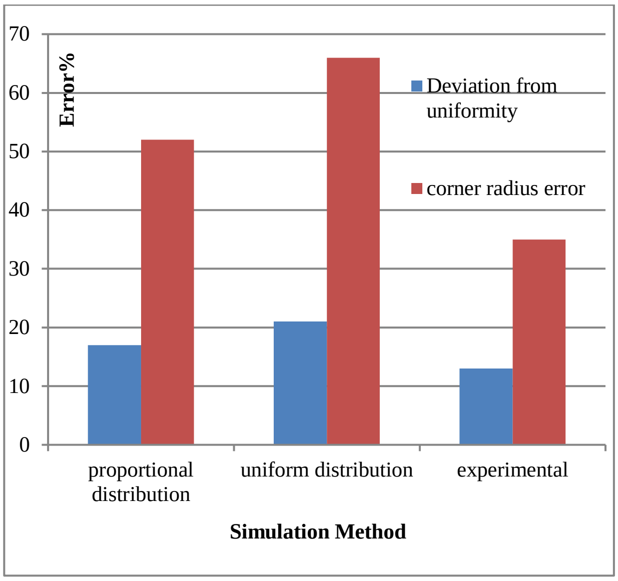


Figure 2. The effect of uniformity of force distribution on the reduction of corner radius error

5. Conclusion

In this study, the effects of flower pattern design on the way distribution of the applied force to the rollers and their power consumption at different reshaping stations were investigated experimentally and numerically. To do this, three different flower patterns were evaluated using three-dimensional finite element simulations, and practical experiments were performed to ensure the accuracy of the simulations.

The simulation results showed that although the power consumption for reshaping in experimental flower pattern is 2.8% more than the proportional distribution method and 7.9% more than the uniform distribution method, respectively, this method is 17% and 31% more successful in forming the corner than the mentioned patterns, and the distribution of vertical force on its rollers is 4% and 8% more uniform, respectively.

As a result, due to the uniformity of the vertical force in the experimental method, the friction and wear conditions of the rollers will be more uniform than other methods. Therefore, it can be concluded that in order to select a more suitable flower pattern, the use of uniform distribution of applied force along with the criterion of minimum energy consumption leads to more suitable conditions.

https://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir   DOI: 10.22067/jacsm.2022.74655.1090

تأثیر الگوی گل بر توزیع یک‌نواخت نیروی وارد بر غلتک‌ها در شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد*

مقالهٔ پژوهشی

حسین ارزنده [۱]   حسن مسلمی نائینی [۲]   مهدی تاجداری [۳]   سیامک مزدک[٤]   مانابو کیوچی [۵]

چکیده در این مقاله، اثر طراحی الگوی گل بر انرژی مصـــرفی و نیز چگونگی توزیع نیروی وارد بر غلتک‌ها در ایســتگاه‌های مختلف شــکل‌دهی مجدد غلتکی سرد به‌صورت تجربی و عددی بررسی گردیده‌است. به‌منظور مطالعهٔ اثر متغیرها از شبیه‌سازی اجزای محدود سه‌بعدی استفاده شده و برای اطمینان از صحت شبیه سازی‌ها آزمایش عملی انجام شده‌ا ست. از مقایسهٔ ابعادی و نیز مقایسهٔ توان مصرفی به‌عنوان ابزارهای صحه‌گذاری بر شبیه سازی‌ها ا ستفاده شده‌است. ضمن معرفی شیوه‌های مختلف طراحی الگوی گل، نیروی اعمالی بر غلتک‌ها در سه طراحی مختلف الگوی گل بررسی شده‌است. مقادیر و نحوهٔ تغییرات انرژی کرن شی، کار خارجی و انرژی داخلی طی زمان در هر روش مورد برر سی قرار گرفته‌ا ست. هم‌چنین چگونگی توزیع نیروی وارد بر غلتک‌ها در هر روش ت شریح شده‌ا ست. علاوه‌بر معیار انرژی م صرفی کمینه، یک‌نواختی توزیع نیروی وارد بر غلتک‌ها نیز به‌عنوان معیاری برای طراحی الگوی گل معرفی شده‌است و نشان داده شده که استفاده از معیار یک‌نواختی نیروی اعمالی به غلتک‌ها در کنار معیار انرژی مصرفی کمینه، موجب افزایش دقت ابعادی محصول می‌شود.

واژه‌های کلیدی شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد، الگوی گل، یک‌نواختی توزیع نیرو، انرژی مصرفی.

مقدمه

در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد لولهٔ گرد طی عبور از چند ایستگاه شکل‌دهی، به پروفیل غیر گرد تبدیل می‌شود. عامل اساسی لازم برای تجزیه‌وتحلیل فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد، الگوی گل است. الگوی گل شکلی است مصور که از کنار هم قرار دادن مقاطع حاصل از ایستگاه‌های شکل‌دهی بر مبنای یک محور مشترک ایجاد می‌گردد [1]. برای تجزیه‌وتحلیل فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد روش‌های تقریبی مختلف تجربی، نیمه‌تجربی و تحلیلی توسط محققان ارائه شده‌است. مسلمی نائینی و همکاران [2] در سال ۲۰۰۱ یک برنامه براساس روش تعادل نیروها و گشتاور در یک المان برای تحلیل دوبعدی تغییر شکل کشسان- مومسان لوله در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی لوله‌های گرد به لوله‌هایی با مقطع غیر گرد تدوین نمودند. با استفاده از این برنامه، شکل هندسی، توزیع نیروها و گشتاورهای خمشی وارد به لوله برای مقاطع مختلف بررسی شده‌است. آن‌ها هم‌چنین روش رفت و برگشتی را توسعه دادند و قابلیت‌های این روش را در طراحی الگوی گل در شکل‌دهی مجدد غلتکی نشان دادند. یانگ مینگ [3] در سال ۲۰۰۸ با استفاده از قالب‌های Vشکل به بررسی تأثیر پارامترهای اصطکاک، نسبت هندسی، جنس لوله‌ها و میزان کاهش ارتفاع بر روی نیروی شکل‌دهی و حالت‌های عیوب پیش‌آمده در تبدیل لوله‌های چهارگوش از لولهٔ گرد اولیه پرداخت. وی نشان داد در شرایط اصطکاکی لغزنده با یک مقدار کاهش ارتفاع یکسان، با کاهش ضخامت احتمال ایجاد عیب جدایش کاهش می‌یابد. علی‌نژاد و همکاران [4] در سال ۲۰۰۹ با توسعهٔ روش مرجع [2] یک روش تحلیل دوبعدی برای بررسی رفتار تغییر شکل کشسان- مومسان سطح مقطع لوله در طی فرایند شکل‌دهی لوله‌های گرد به مقاطع مربعی و مستطیلی ارائه کردند و توانستند شکل لولهٔ فلزی تغییر شکل یافته در بین دو ایستگاه مجاور را به‌دست آورند. چن و یه [5] در سال ۲۰۱۱ تأثیر پارامترهای ضریب اصطکاک، ضریب کرنش سختی و نسبت

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۱۰/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۲/۱۱ می‌باشد.
(۱) دانشجوی دکترای ساخت و تولید-دانشگاه تربیت مدرس-تهران
(۲) نویسنده مسئول: استاد دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، **Email**: moslemi@modares.ac.ir
(۳) استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی الکترونیک، مکانیک و کامپیوتر، دانشگاه ایوانکی-ایوانکی
(٤) استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تفرش، تفرش
(۵)Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Bunkyo, Japan

هندسی را بر روی رخ دادن عیوب در فرایند شکل‌دهی مجدد غلتکی در حالت‌های مختلف مورد بحث قرار دادند و روابطی برای پیش‌بینی احتمال وقوع عیب جدایش متناسب با نسبت هندسی ارائه کردند. رایالا و گوود [6] در سال ۲۰۱۶ تأثیر میزان کاهش ارتفاع در هر مرحله بر خواص و کیفیت محصول نهایی را مورد بررسی قرار دادند. اثر میزان کاهش ارتفاع بر تغییرات ضخامت دیواره، شعاع گوشهٔ لوله و توان مصرفی را براساس شیوهٔ توزیع یک‌نواخت به‌دست آوردند. آن‌ها نشان دادند بر اساس این شیوه طراحی الگوی گل توان مصرفی ایستگاه به ایستگاه افزوده می‌شود. شائو و همکاران [7] در سال ۲۰۱۸ سعی کردند که با توجه به اثر متغیرهای مختلف فرایند نظیر خواص فلز مدول یانگ، استحکام تسلیم و شرایط سخت‌شوندگی آن، در فرایند شکل‌دهی غلتکی مجدد روابطی برای توزیع تنش پس‌ماند در محصول ارائه کنند. تاجیار [8] در سال ۲۰۱۹ تأثیر متغیرهای مقدار کاهش ارتفاع و اصطکاک بر ایجاد عیب جدایش را موردبررسی قرار داد و نشان داد در شرایط لولهٔ جدارنازک اصطکاک می‌تواند وقوع عیب جدایش را تحت تأثیر قرار دهد درحالی‌که لوله‌های جدارضخیم نسبت‌به اصطکاک حساس نیستند. ژنگ و همکاران [9] در سال ۲۰۲۰ به بررسی مقاطع مربعی و مستطیلی پرداختند و نشان دادند که وقتی الگوی گل دارای تعداد ایستگاه‌های زیاد باشد، یک مدل عددی کارامد و دقیق برای تحلیل فرایند ضروری است. مزدک و همکاران [10] در سال ۲۰۲۱ با استفاده از روش تعادل المان و توسعهٔ روش مرجع [2] روشی برای طراحی غلتک‌های مقاطع دارای تاخوردگی ارائه کردند. هم‌چنین مدلی عددی بر اساس این روش تهیه و ارائه نمودند و روشی اختصاصی برای طراحی غلتک‌ها در فرایند شکل‌دهی مجدد تدوین کردند و نشان‌دادند عامل ایجادکنندهٔ عیب جدایش، سخت شدن غیریک‌نواخت لوله است.

بررسی طراحی غلتک، چگونگی شکل‌گیری، مقدار کاهش ارتفاع و در نهایت طراحی الگوی گل موضوع مشترک تحقیقات فوق‌الذکر است. ملاحظه می‌شود که این تحقیقات اثر الگوی گل بر عیوب و خواص محصول را بررسی کرده‌اند. هم‌چنین روش‌هایی برای طراحی الگوی گل بر مبنای هندسهٔ مقطع و لولهٔ اولیه ارائه‌داده‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد، اما در این تحقیقات، اثر طراحی الگوی گل غلتک بر نیروی اعمالی به غلتک‌ها گزارش نشده‌است.

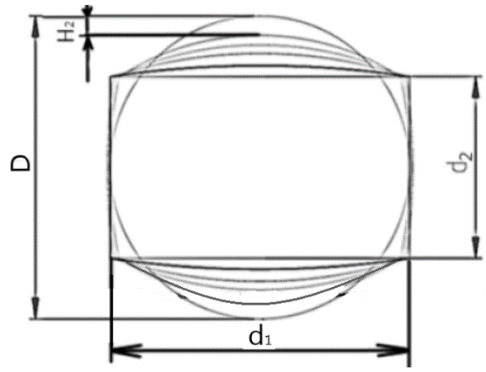
از سوی دیگر برای کاهش هزینه‌ها و کاهش توقف خط تولید، تلاش صنعتگران بر این است که طراحی الگوی گل غلتک‌ها به‌گونه‌ای باشد که همگی باهم به تعمیر و تراش‌کاری نیاز پیدا کنند. بنابراین باید شرایط سایش غلتک‌ها یک‌نواخت باشد و بدین‌جهت لازم است تا توزیع نیروی عمودی وارد بر غلتک‌ها یک‌نواخت باشد.

در این مقاله بر اساس سه الگوی گل منطبق بر نمونهٔ عملی، توزیع یک‌نواخت و توزیع متناسب مقدار کاهش ارتفاع، شبیه سازی اجزای محدود الگوی گل انجام شده است. برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی توان مصرفی، شکل هندسی محصول حاصل از شبیه‌سازی با نمونهٔ تجربی آن مقایسه و تطابق خوبی مشاهده شد. در نهایت توان مصرفی، شکل هندسی محصول و نیروی وارد بر غلتک‌ها بین سه الگوی گل مقایسه و الگوی گل مناسب انتخاب شد.

روش‌های معرفی‌شدهٔ طراحی الگوی گل در منابع پیشین

محققان مختلف روش‌های گوناگونی برای طراحی الگوی گل ارائه کرده‌اند. روش‌های مهم عبارتند از:

الف) روش توزیع یک‌نواخت. چگونگی محاسبهٔ میزان کاهش در راستای ارتفاع و عرض لوله در هر ایستگاه طبق این روش در معادلهٔ (۱) نشان داده شده است. ابعاد کلی و مفاهیم پایهٔ معادلهٔ موردنظر نیز در شکل (۱) نشان داده شده‌است. در این روش، ارتفاع و عرض لوله در هر ایستگاه نسبت‌به ایستگاه قبلی به اندازهٔ ثابت H کاهش می یابد. ابعاد لوله پس از شکل‌دهی مجدد d، قطر لولهٔ گرد اولیهٔ D و تعداد ایستگاه‌های موردنیاز برای شکل‌دهی N فرض شده‌است [11].



شکل ۱ ابعاد کلی لوله با مقطع مستطیلی و لولهٔ اولیه

$$H_1 = \frac{D - d_1}{N} \quad \& \quad H_2 = \frac{D - d_2}{N} \qquad (۱)$$

ب) روش‌های توزیع کاهشی. از آن‌جایی‌که براثر کارسختی تغییر شکل ورق دشوارتر می‌شود بر این اساس در این روش طراحی مقدار شکل‌دهی در هر ایستگاه از ایستگاه ابتدایی تا ایستگاه انتهایی رفته‌رفته کم‌تر در نظر گرفته می‌شود [11]. این شیوه به‌طور کلی منتخب صنعتگران بوده‌است اما مقدار شکل‌دهی در هر ایستگاه مبتنی‌بر دانش و سعی و خطا صورت می‌گیرد. در سال ۲۰۰۱ توسط ون و همکاران [12] شیوه‌ای به نام شیوهٔ توزیع متناسب ارائه شده‌است. در این روش با داشتن تعداد ایستگاه و به کمک رابطهٔ ارائه‌شده، میزان کاهش ارتفاع لوله در هر ایستگاه با جایگزین کردن متغیرهای طراحی در معادلهٔ (۲) به‌دست می‌آید. ارتفاع لوله در این روش در ایستگاه اول بیشترین کاهش را داراست و به‌تناسب در ایستگاه‌های بعدی اندازهٔ آن کاهش می‌یابد. در این روش ارتفاع لوله پس از شکل‌دهی مجدد l، قطر لولهٔ گرد اولیه D و n شماره ایستگاه است و تعداد ایستگاه‌های موردنیاز برای شکل‌دهی N فرض می‌شود و معادلهٔ (۲) برای تخمین ارتفاع لوله و میزان کاهش ارتفاع در nامین ایستگاه معرفی می‌شود [12]:

$$l_0 = D \;, l_n = \frac{l_{n-1}}{K} \;, K = \left(\frac{D}{l}\right)^{\frac{1}{N}} \qquad (۲)$$

شبیه‌سازی عددی فرایند

انتخاب مقطع مورد بررسی و مدل‌سازی. برای بررسی اثر الگوی گل بر نیروی شکل‌دهی، مقطع مستطیلی ۴۰×۶۰ میلی‌متر با ضخامت ۳ میلی‌متر انتخاب شده‌است. برای آن سه الگوی گل، منطبق بر شیوه‌های طراحی ذکرشده و الگوی گل تجربی مورد استفاده در یکی از شرکت‌های تولیدکننده طراحی شده و همگی آن‌ها مورد شبیه‌سازی قرارگرفته‌اند. در تمامی مدل‌ها منطبق بر شرایط خط تولید، یک ایستگاه اولیه به‌عنوان نگه‌دارنده و سپس ۵ عدد غلتک شکل‌دهنده با فاصلهٔ ۶۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. ابعاد غلتک‌ها نیز مشابه ابعاد خط تولید لحاظ شده‌است و تنها تفاوت غلتک‌ها در مدل‌های مختلف، در میزان کاهش ارتفاع مربوط به آن‌ها است. در جدول (۱) مقادیر کاهش ارتفاع در ایستگاه‌های مختلف طبق هر الگو بیان شده‌است. غلتک‌های صلب تحلیلی و لوله از مادهٔ شکل‌پذیر انتخاب شده‌اند. ضخامت لولهٔ اولیه ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. برای کاهش زمان شبیه‌سازی‌ها، با در نظر گرفتن فاصلهٔ بین ایستگاه‌ها، طول لوله ۱۸۰۰ میلی‌متر و بدون درز در نظر گرفته شده‌است، به‌صورتی که محصول، درآن‌واحد حداقل در سه ایستگاه با غلتک‌ها در تماس باشد.

در جدول (۱) متغیرهای H_1و H_2 به‌ترتیب به مقدار کاهش عرضی و ارتفاعی به‌ترتیب در بعد ۶۰ و ۴۰ محصول اشاره دارند. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود مقدار کاهش در راستای H_1 در تمامی الگوها در ایستگاه اول مشابه است و در ایستگاه‌های بعدی نیز تفاوت آن‌ها ناچیز است، اما در مورد H_2 این تفاوت‌ها قابل‌توجه و معنادار هستند و تفاوت عمدهٔ الگوهای مختلف در این بعد نمایان می‌شود.

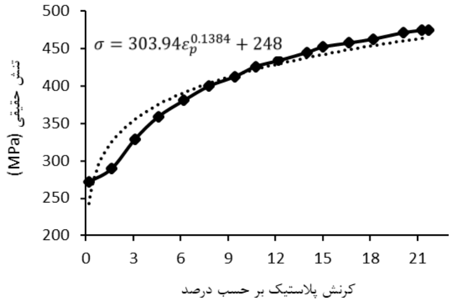
جدول ۱ مقدار کاهش ارتفاع در ایستگاه‌های مختلف الگوی گل‌های طراحی‌شده

	متغیر	شمارهٔ ایستگاه				
نام روش	کاهش (mm)	۱	۲	۳	٤	۵
توزیع یک‌نواخت	H_1	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲
	H_2	٤/۷۲	٤/۷۲	٤/۷۲	٤/۷۲	٤/۷۲
توزیع متناسب	H_1	۰/۷٤	۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۷۱	۰/۷
	H_2	۵/٦۳	۵/۱۳	٤/٦۸	٤/۲٦	۳/۸۹
الگوی گل تجربی	H_1	۰/۷٦	۰/۹٤	۰/۹۲	۰/۹۸	.
	H_2	۸/۱۸	۳/۹	۳/٦٤	٤/۰۸	۳/۸

خصوصیات مادهٔ خام

فلز مورد بررسی فولاد ST37 است و از ورق محصول در حال تولید نمونه گرفته شده‌است. مشخصات مادهٔ خام به‌وسیلهٔ

آزمایش کشش استخراج گردیده و در شبیه‌سازی وارد شده‌است. از ورق اولیه (قبل از لوله شدن) سه عدد نمونهٔ هم‌راستا (راستای نورد) تهیه و آزمایش کشش انجام شده و میانگین مقادیر آن‌ها گزارش شده‌است. در شکل (۲) نمودار تنش و کرنش به‌دست آمده از آزمایش کشش است. در جدول (۲) خصوصیات مادهٔ خام ذکر شده‌است.



شکل ۲ منحنی تنش- کرنش پلاستیک حقیقی حاصل از آزمایش کشش

جدول ۲ خصوصیات فولاد St37

مدول یانگ GPa	ضریب پواسان	تنش تسلیم MPa	تنش نهایی MPa	کرنش بیشینه (٪)	ضریب K MPa	توان n کرنش سختی
۲۰۱	۰/۳	۲۷۲	٤٧٤	۲۱/٥	۳۰٤	۰/۱۳٥

مش‌بندی، شرایط مرزی و نحوهٔ تعریف تماس

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد لوله به‌صورت توپر مدل شد و برای المان‌بندی از المان C3D8R که از انواع المان آجری ۸ نقطه‌ای با روش انتگرال کاهش یافته‌است، استفاده شد. غلتک‌ها به‌صورت صلب تحلیلی مدل شدند در شکل (۳) مدل مورد نظر نشان داده شده‌است. به‌منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به اندازهٔ مش‌بندی، شبیه‌سازی‌ها از تعداد المان کم به زیاد انجام شد. با ملاک قرار دادن نیروی وارد بر غلتک‌ها در ایستگاه اول شکل‌دهی، تعداد المان‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شد که نیروی ایستگاه اول کم‌تر از ٥ درصد تغییرات داشته باشد و در نهایت مدلی با تعداد المان ۳۲٦٤۰ عدد انتخاب شد. کل شبیه‌سازی در یک مرحله با خصوصیت دینامیک صریح انجام شده‌است. نحوهٔ حرکت لوله نیز مشابه حالت واقعی بر اثر چرخش غلتک‌ها و راندن لوله در نظر گرفته شده‌است. سرعت دورانی غلتک‌ها منطبق بر سرعت خط تولید برابر با ۱۳/٥ rad/s در نظر گرفته شده‌است. تماس بین غلتک‌ها و لولهٔ تماس سطح‌به‌سطح و با ضریب اصطکاک ۰/۲ انتخاب شده‌است [13].

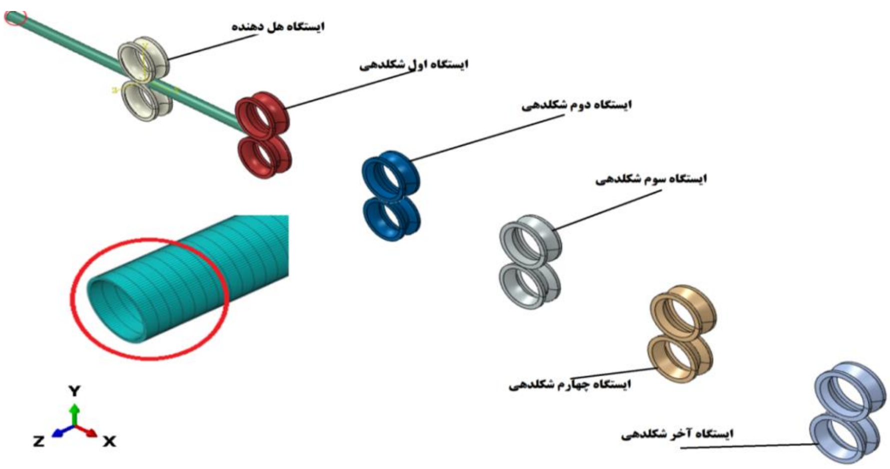
آزمایش عملی

برای اطمینان از نتایج شبیه‌سازی‌ها، آزمایش عملی در یکی از خطوط تولید صورت گرفته‌است و نتایج شبیه‌سازی‌ها با آزمایش‌های تجربی مقایسه شده‌اند. شکل (٤) تصویری از محصول در حال تولید در آزمایش تجربی را نشان می‌دهد.

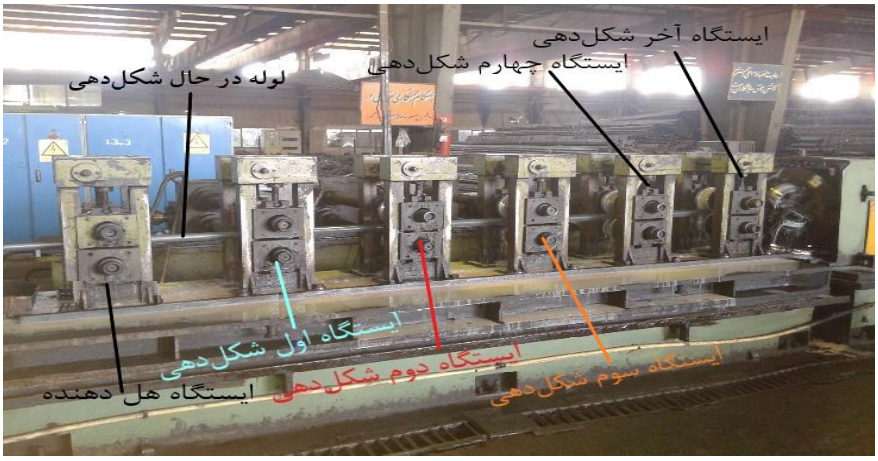
موارد بررسی شده عبارتند از:

۱) ابعاد بیرونی، ۲) ضخامت محصول در لبه‌ها و گوشه، ۳) شعاع گوشه، ٤) مقدار تورفتگی، ٥) ابعاد هندسی (تعامد لبه‌ها) و ٦) توان مصرفی برای شکل‌دهی. موقعیت موارد در شکل (٥) نشان داده شده‌است.

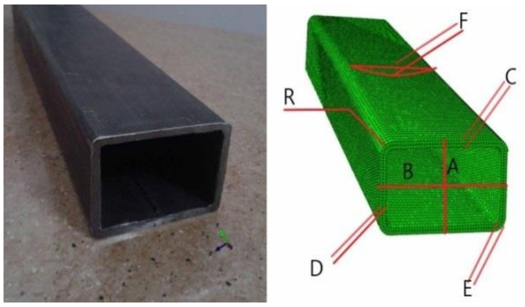
نتایج این مقایسه‌ها در جدول (۳) ذکر شده‌اند.



شکل ۳ مدل ایجاد شده و المان‌بندی شده



شکل ۴ لولهٔ در حال شکل‌دهی



شکل ۵ نمونهٔ محصول عملی و شبیه‌سازی و عناوین موارد مورد مقایسه

جدول ۳ مقایسهٔ نتایج آزمایش عملی و شبیه‌سازی

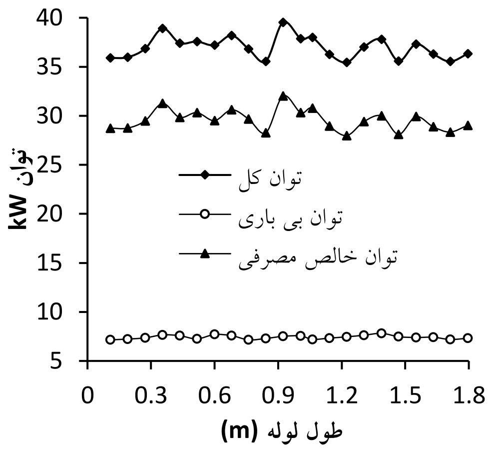
موارد مورد سنجش		مقدار شبیه‌سازی	مقدار تجربی	اختلاف (٪)
ابعاد بیرونی (mm)	اندازه ۴۰ (A)	۳۹/۸۸	۴۰/۲۵	۰/۹۱
	اندازه ۶۰ (B)	۶۰/۰۷	۶۰/۲	۰/۲۲
ضخامت محصول (mm)	لبه (C,D)	(۳/۰۷، ۳/۰۶)	(۳/۱۲، ۳/۱۴)	(۱/۶، ۲/۵)
	گوشه (E)	۳/۵۲	۳/۳۹	۳/۸۲
شعاع گوشه (R) (mm)		۵/۴	۴/۳۸	۲۳/۲۹
مقدار تورفتگی (F) (mm)		۰/۲۹	۰/۲۵	۱۶
ابعاد هندسی	تعامد (درجه)	−۰/۹۸ (۸۹/۰۲)	−۰/۴۶ (۸۹/۵۴)	۰/۵۸
توان مصرفی برای شکل‌دهی (kw)		۲۷/۴۳	۲۹/۵۵	۷/۱۷

تمامی اندازه‌گیری‌ها برای اطمینان از صحت آن‌ها سه مرتبه تکرار شده‌اند و میانگین آن‌ها به‌عنوان اندازهٔ موردنظر در نظر گرفته شده‌است.

ابعاد بیرونی و ضخامت با استفاده از کولیس معمولی با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شده‌اند. برای ضخامت محصول در گوشه‌ها، از ۴ گوشهٔ محصول نمونه‌برداری شده‌است. در مورد شعاع گوشه‌ها شعاع چهارگوشهٔ محصول عملی به‌وسیلهٔ شعاع‌سنج با پلکان نیم میلی‌متر، اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها گزارش شده‌است. در شبیه‌سازی نیز برای اندازه‌گیری شعاع، از گره‌ها کمانی عبور داده شده و شعاع کمان به‌دست آمده‌است. در این مورد ۲۳ ٪ اختلاف مشاهده شده‌است که دلیل آن می‌تواند خطای ناشی از فاصلهٔ پلکانی بین مقادیر شعاع‌سنج باشد. در مورد مقدار تورفتگی، در نمونهٔ عملی مقدار تورفتگی بااستفاده از کولیس عمق‌سنج با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شده‌است. برای پرهیز از اثرات ناشی از برش، موقعیت اندازه‌گیری ۵۰ سانتی‌متر دورتر از مقطع برش‌خورده انتخاب شده‌است. در مورد مقدار تورفتگی ۱۶٪ اختلاف مشاهده می‌شود. برای اندازه‌گیری تعامد، ابتدا به‌کمک گونیای دقیق (گونیای مویی) و دستهٔ فیلر استاندارد با فاصلهٔ پلکانی ۰/۰۵ میلی‌متر، حد فاصل لبهٔ محصول تا وضعیت تعامد دقیق اندازه‌گیری شده‌است. علاوه‌بر مشخصات هندسی، مقدار توان مصرفی نیز برای صحه‌گذاری شبیه‌سازی اندازه‌گیری شده‌است.

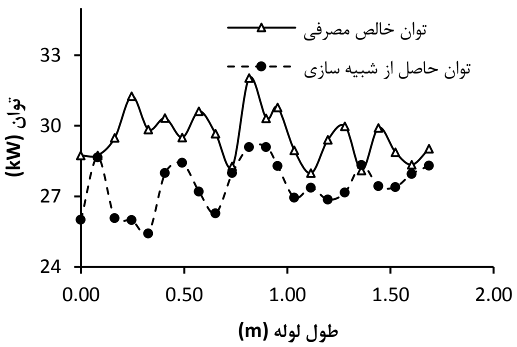
توان مصرفی برای شکل‌دهی مجدد. در خط تولید قبل از انجام شکل‌دهی انرژی به‌صورت‌های مختلفی مثل انرژی موردنیاز

برای گردش غلتک‌ها و گیربکس‌ها، اصطکاک بین اجزای انتقال‌دهندهٔ نیرو و انرژی لازم برای به حرکت درآوردن خود موتور، تلف می‌شود. برای حذف این اتلاف‌های انرژی، بعد از اندازه‌گیری توان در حین فرایند شکل‌دهی، توان مصرفی در هنگام بی‌باری نیز اندازه‌گیری شده و از توان مصرفی کل کم شده‌است. در شکل (٦) توان مصرفی کل، توان مصرفی در هنگام بی‌باری و توان خالص شکل‌دهی نمایش داده شده‌است.



شکل ٦ توان مصرفی کل، توان مصرفی در هنگام بی‌باری و توان خالص شکل‌دهی

برای اندازه‌گیری توان، مقدار جریان مصرفی با آمپرسنج اندازه‌گیری شد. در شکل (٧) توان خالص مصرفی خط موجود و توان شبیه‌سازی مقایسه شده‌است. در این مورد مقدار ٧/١٪ اختلاف مشاهده شده‌است.



شکل ٧ مقایسهٔ توان خالص مصرفی خط موجود و توان حاصل از شبیه‌سازی

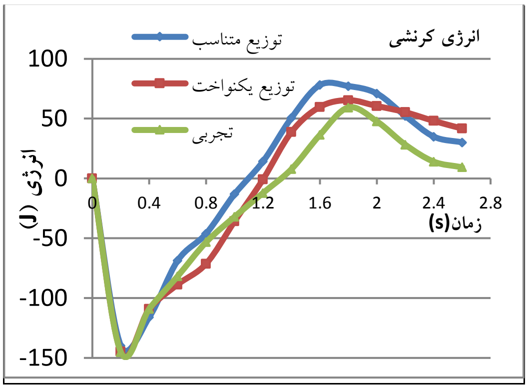
درمجموع با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، کیفیت شبیه‌سازی مطلوب است و نتایج آن قابل اعتماد می‌باشد.

نتایج و بحث

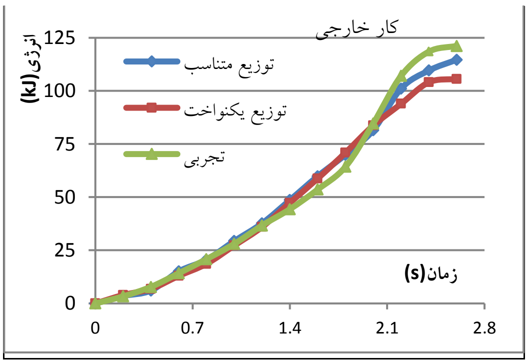
میزان کاهش ارتفاع در هر ایستگاه، طبق الگوی تولیدکنندهٔ صنعتی و هم طبق دو شیوهٔ طراحی الگوی گل موردنظر در جدول (١) آورده شده‌اند.

انرژی موردنیاز به‌صورت‌های مختلفی مانند انرژی داخلی، کار مومسانی، کار خارجی و انرژی کرنشی مصرف می‌گردد. بررسی برخی از این موارد در سه الگوی گل مختلف از شکل (٨) تا شکل (١٠) صورت گرفته‌است. نکتهٔ قابل توجه در این شکل‌ها، مشابهت بسیار زیاد مقادیر انرژی و نحوهٔ تغییرات آن طی زمان در هر مورد بین الگوی گل‌های مختلف است.

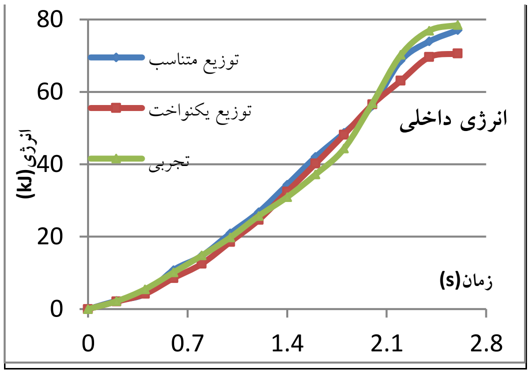
در جدول (٤) مقدار نیروی وارد بر غلتک‌ها در الگوهای گل حاصل از شبیه‌سازی نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که مقادیر نیروهای اعمالی به الگوی گل‌ها بسیار وابسته است. توزیع این نیروها در الگوی تجربی نسبت‌به الگوهای دیگر یک‌نواخت‌تر است.



شکل ٨ انرژی کرنشی سه الگوی گل مختلف



شکل ٩ کار خارجی سه الگوی گل مختلف



شکل ۱۰ انرژی داخلی سه الگوی گل مختلف

همچنین در شکل (۱۲) توزیع توان مصرفی در ایستگاه‌ها طبق الگوهای مختلف گل غلتک نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که در شرایط خط تولید تجربی ایستگاه اول بیشترین توان را مصرف کرده‌است ولی در الگوهای حاصل از شبیه‌سازی مقدار توان مصرفی ایستگاه به ایستگاه افزایش یافته و در ایستگاه آخر به نهایت خود رسیده‌است. البته در الگوی گل غلتک توزیع متناسب، شیب افزایش بین ایستگاه‌ها ملایم‌تر است. از طرف دیگر با توجه به مقادیر نیروی وارد بر غلتک‌ها (جدول ٤) می‌توان نتیجه گرفت این تفاوت نتایج بین الگوی گل روش تجربی و روش‌های عددی، یک مزیت قابل‌توجه در روش تجربی است، چرا که بدون اعمال نیروی عمودی مازاد بر غلتک‌های ایستگاه اول موجب انجام کار مومسانی بیشتری نسبت‌به الگوهای دیگر شده‌است. توضیح این‌که مقادیر شعاع غلتک‌ها، ضریب اصطکاک، مشخصات ابعادی لولهٔ اولیه و خواص مادهٔ خام در همهٔ روش‌ها یکی است؛ لذا انتظار می‌رود نیروی عمودی وارد بر غلتک‌ها، مهم‌ترین عامل تعیین‌کنندهٔ تفاوت تلفات ناشی از اصطکاک در شیوه‌های مختلف باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که مقدار توان مصرفی روش تجربی در ایستگاه آخر کم‌ترین مقدار بین روش‌ها است. این امر از آن لحاظ اهمیت دارد که ایستگاه آخر، بیشترین سهم را در ویژگی‌های مکانیکی محصول تولیدی دارد و هر چه بار این ایستگاه کمتر باشد تنش پس‌ماند در قطعه کم‌تر می‌شود و محصولی با خواص مکانیکی مطلوب‌تر به‌دست می‌آید.

همچنین شکل (۱۳) مقادیر کل توان مصرفی الگوهای گل غلتک مختلف را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که روش تجربی به مقدار ٪۲/۸ نسبت‌به الگوی گل غلتک توزیع متناسب و ٪۷/۹ نسبت‌به الگوی گل غلتک توزیع یکنواخت، انرژی بیشتری برای شکل‌دهی استفاده کرده‌است. مشخصات ابعادی محصول نیز طبق سه الگوی گل غلتک، در جدول (۵) آورده شده‌است.

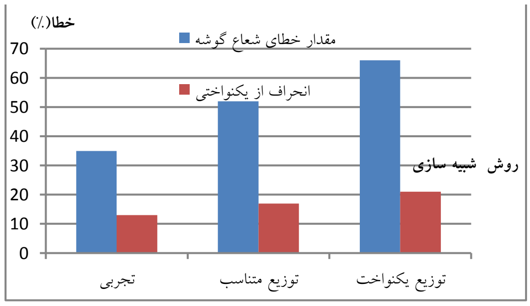
مطابق شکل (۱۱) مقدار خطا در شکل‌دهی گوشه در شبیه‌سازی روش تجربی ٪۳۵، در روش توزیع متناسب ٪۵۲ و در روش توزیع یکنواخت ٪٦٦ است لذا روش تجربی نسبت به الگوهای توزیع متناسب و یکنواخت به‌ترتیب ٪۱۷ و ٪۳۱ موفق‌تر بوده‌است. همچنین در شکل (۱۱) نشان داده شده‌است که افزایش غیریکنواختی توزیع نیز موجب افزایش خطای شعاع گوشه می‌گردد.

جدول ٤ مقایسهٔ نیروهای وارد بر غلتک‌ها در وضعیت‌های توزیع متناسب، توزیع یکنواخت و تجربی

شمارهٔ ایستگاه	مقدار نیرو در شبیه‌سازی انواع الگوهای گل غلتک (KN)		
	توزیع متناسب	توزیع یکنواخت	تجربی
۱	٤۲	۳۵	۵۱
۲	۵۰	٤۰	٤۳/۵
۳	۵۰	٤٤	۵۰
٤	۵٦	٤۸	۵۰
۵	۵۹/۵	۵۳/۵	۵٦/۵
میانگین	۵۱/۵	٤٤/۱	۵۰/۲
اختلاف حداقل و حداکثر از میانگین	-۹/۵ +۸	-۹/۱ +۹/٤	-٦/۷ +٦/۳
درصد اختلاف نسبت به میانگین	٪۱۷	٪۲۱	۱۳٪

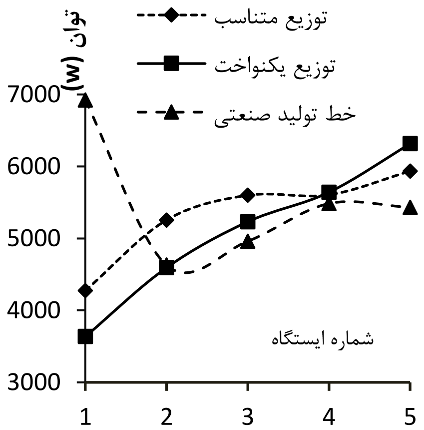
جدول ۵ مقادیر ابعادی حاصل از شبیه‌سازی سه الگوی گل مختلف

مقادیر ابعادی حاصل از شبیه‌سازی mm				
شیوهٔ طراحی الگوی گل	در بعد ٦۰	در بعد ٤۰	شعاع گوشه	مقدار شعاع مورد انتظار
خط تولید تجربی	٦۰/۰۷	۳۹/۸۸	۵/٤۲	٤
توزیع متناسب	٦۰/۱۲	٤۰/۱٤	٦/۰۷	٤
توزیع یکنواخت	٦۰/۱۵	٤۰/۲۱	٦/٦٤	٤

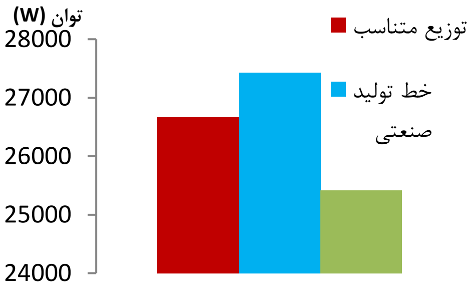


شکل ۱۱ اثر یک‌نواختی توزیع نیرو بر کاهش خطای شعاع گوشه

مطابق شکل (۸) انرژی کرنشی خط تولید تجربی نسبت‌به الگوهای دیگر کم‌تر است اما طبق شکل (۱۳) توان مصرفی این روش نسبت‌به بقیهٔ روش‌ها بیشتر است. هر چند از لحاظ انرژی مصرفی، مقدار توان روش تجربی بیشتر است اما از نظر ابعادی در مورد شعاع گو شه نسبت‌به دو شیوهٔ دیگر موفق‌تر بوده‌است و این تفاوت توان مصرفی نیز می‌تواند مربوط به توان موردنیاز برای ایجاد شعاع گوشه باشد.



شکل ۱۲ توزیع توان مصرفی در ایستگاه‌ها طبق الگوی گل‌های مختلف



شکل ۱۳ توان کل مصرفی حاصل از شبیه‌سازی طبق الگوی گل‌های مختلف

نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر طراحی الگوی گل بر چگونگی توزیع نیروی اعمالی به غلتک‌ها و توان مصرفی آن‌ها در ایستگاه‌های مختلف شکل‌دهی غلتکی مجدد به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته‌است. برای این بررسی‌ها سه الگوی گل مختلف به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار تجاری آباکوس به‌صورت سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی‌ها آزمایش عملی نیز صورت گرفته‌است.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده‌است که در الگوی گل غلتک تجربی نسبت‌به الگوی توزیع متناسب ٪۲/۸ و نسبت‌به الگوی توزیع یک‌نواخت ٪۷/۹ توان مصرفی بیشتری برای شکل‌دهی مورد نیاز است. هم‌چنین روش تجربی نسبت‌به الگوهای توزیع متناسب و یک‌نواخت به‌ترتیب ٪۱۷ و ٪۳۱ در شکل‌دهی گوشه موفق‌تر بوده‌است. هم‌چنین نشان داده شد که در روش تجربی توزیع نیروی عمودی وارد بر غلتک‌ها نسبت‌به الگوی توزیع متناسب و توزیع یک‌نواخت به‌ترتیب ٪٤ و ٪۸ یک‌نواخت‌تر است. درنتیجه این یک‌نواختی نیروی عمودی شرایط اصطکاک و استهلاک غلتک‌ها در روش تجربی نسبت‌به دیگر روش‌ها یک‌نواخت‌تر خواهد بود؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که برای انتخاب الگوی گل مناسب‌تر، استفاده از توزیع یک‌نواخت نیروی اعمالی در کنار معیار انرژی مصرفی کمینه منجر به شرایط مناسب‌تری می‌شود.

تقدیر و تشکر

از شرکت لوله و پروفیل مهدی و به‌ویژه از جناب آقای مهندس ترابی بابت قبول زحمات انجام آزمایش‌ها و همکاری در اندازه‌گیری‌ها بسیار سپاس‌گزاری می‌شود.

واژه نامه

شکل‌دهی مجدد غلتکی سرد	Reshaping of cold roll forming
الگوی گل	Flower Pattern
یک‌نواختی توزیع نیرو	Uniform distribution of force
انرژی مصرفی	Energy consumption

مراجع

1. Halmos, G.T., "Roll Forming Handbook", CRC Press, VOl. 1, Pp. 153 (2005)
2. Kiuchi, M., Naeini, H.M. and Shintani, K, "Computer Aided Design of Rolls for Reshaping Processes from Round Pipes to “Channel-Type” Pipes", *Journal of Materials Processing Technology*, VOl. 111, No.1, Pp. 193-197, (2001).
3. Huang, Y.M., "Elasto-Plastic Finite Element Analysis of Squaring Circular Tube", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, VOl. 18 , NO 3: P. 665-673, (2008). , ..
4. Alinezhad, P., Sanati, A. and Momtahen, K.N. "Computer Aided Design of Reshaping Process of Circular Pipes into Square Pipes", *International Journal of Mathematical and Computational Sciences*, VOl. 3, NO. 7, Pp. 468-472, (2009)
5. Chen, T.C. and Ye, J.M., "Finite-Element Analysis of the Double Lateral Compression of Clad Tube into a Symmetric Square-Tube", *Advanced Materials Research*, VOl 337: Pp. 332-335, (2011)
6. Rayala, P. and Goud, S.C., "Reshaping of Thick Tubes into Square Passes at Ends with FEM Simulation", *AIJREAS*, VOl. 1, NO. 4, P. 6, (2016).
7. Shao, C., Zhang, P. Zhu, Y. Zhang, Z. Tian, Y. and Zhang, Z., "Simultaneous Improvement of Strength and Plasticity: Additional Work-Hardening from Gradient Microstructure", *Acta Materialia*, VOl. 145, Pp. 413-428, (2018).
8. Tajyar, A., "Investigating the Effect of Different Parameters on the Occurrence of Collapse Defect in Re-Shape Rolling of Circular Pipe into a Square Tube", *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, VOl. 6, NO. 4, Pp. 14-22, (2019).
9. Zheng, B., Shu, G., Wang, J., Gu, Y. and Jiang, Q., "Predictions of Material Properties in Cold-Rolled Austenitic Stainless Steel Tubular Sections", *Journal of Constructional Steel Research*, VOl. 164, Pp. 10582, (2020).
10. Mazdak, S., Naeni, H. M., Sheykholeslami, M. R., Kiuchi, M. and Validi, H., "The Effect of the Roller Profile Oncave-In Defect in Reshaping Processby Considering Nonlinear Combine Strain Hardening", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, VOL. 236. NO. 5, Pp. 1-13, (2022).
11. Kang, W., Zhao, Y., Yu, W., Wang, S., Ma, Y. and Yan, "Numerical Simulation and Parameters Analysis for Roll Forming of Martensitic Steel MS980", *Procedia Engineering*, VOl. 81, Pp. 251-256, (2014).
12. Wen, B., "Using Advanced Tooling Designs to Reshape Round Tube into Square and Rectangular Tubes", OH, USA: Roll-Kraft, Inc, (2001).
13. Tehrani, M.S., Hartley, P., Naeini, H.M., Khademizadeh, H., "Localised Edge Buckling in Cold Roll-Forming of Symmetric Channel Section", *Thin-Walled Structures*, VOl. 44, P. 13, (2006)